第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

内蒙古ERA5再分析降水数据性能评估与极端降水时空特征分析

牛怡莹[1,2,3]， 李春兰[4]， 王 军[1,2,3]， 许瀚卿[1,2,3,5]， 刘 青[1,2,3]

（1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室，上海 200241；2. 华东师范大学地理科学学院，上海 200241；3. 华东师范大学上海城市公共安全研究中心，上海 200241；4. 华东师范大学城市与区域科学学院，上海 200241；5. 华东师范大学崇明生态研究院，上海 202162）

摘 要：ERA5是由欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECWMF）推出的新一代再分析产品，可为地面观测站点稀少地区提供新的降水数据来源。基于2008—2017年内蒙古45个地面站点逐日降水数据，采用多项评价指标评估了ERA5再分析降水数据在多时空尺度上的精度，并结合13个极端降水指数和综合加权模型，采用Sen斜率法和Mann-Kendall趋势检验法分析了1981—2021年该地区极端降水及其危险性时空变化规律。结果表明：（1）ERA5能够较好地再现降水过程，与观测数据在月、季尺度上呈极强相关性（相关系数CC>0.85），在日尺度上表现为强相关（CC=0.68），在空间尺度上，ERA5数据在东部站点探测精度优于西部。（2）除湿日降水强度（SDII）、强降水总量（R95pTOT）以及持续干燥日数（CDD）外，其余极端降水指数在内蒙古均呈现下降趋势，湿日总降水量（PRCPTOT）下降趋势最快，为$-15.74\ \mathrm{mm\cdot(10a)^{-1}}$。（3）极端降水指数在空间上呈现明显区域分异规律，极端降水在内蒙古西部表现为强度增加，在中部表现为频次、强度和持续时间均减少，在东部则表现为强度增加、频次和持续时间减少。（4）极端降水危险性指数在鄂尔多斯市、呼伦贝尔市、巴彦淖尔市和兴安盟等人口相对密集、经济发展较快的市（盟）存在高值中心，呈显著上升趋势，应给予重点关注。

关 键 词：ERA5；降水；精度评估；极端降水指数；内蒙古

文章编号：1000－6060(2023)09－1418－14(1418～1431)

随着全球气候变暖，提高降水数据对极端降水事件的监测精度，是提升气候变化研究、水文模拟预测能力以及灾害风险管理水平的关键环节。内蒙古自治区（简称内蒙古）地处干旱和半干旱季风气候区，地幅辽阔，但地面气象站点分布稀少且不均匀，使其降水时空特征研究受到很大限制[1-3]。因此，找到适合内蒙古的高分辨率网格化降水资料对本区域开展气候变化降水特征研究及灾害风险管理具有重要意义。近些年来，许多学者尝试基于地面气象站点和遥感卫星降水产品等数据对极端降水开展了一系列研究。其中，气象站点资料最为准确，但观测资料时间长度有限，且无法反映出降水的连续空间分布特征[4-5]；遥感卫星降水产品包括热带降雨测量任务TRMM[6-7]、全球降水观测GPM[8]、气象预测中心校正后的产品CMORPH[9]、基于人工神经网络估算的降水产品PERSIANN-CDR[10]等，该类数据能较直接反映降水的时空特征，可解决地面站点数据缺失问题，但卫星反演得到的降水数据原理与地面实测不同，需要地面观测数据进行验证和改良才能更好使用[11]；再分析资料，如ERA5降水数据等，综合了地面站点观测、遥感反演方法的优点，是近几年被广泛使用的数据类型。

收稿日期：2022-11-17； **修订日期**：2023-02-09
基金项目：国家社会科学基金重大项目（18ZDA105）；华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室主任基金（KLGIS2022C01）；国家自然科学基金项目（42001222）；冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目（SKLCS 2020-02）资助
作者简介：牛怡莹（2000-），女，硕士研究生，主要从事多灾害综合风险评估和适应研究. E-mail: 1193418540@qq.com
通讯作者：王军（1975-），男，博士，教授，主要从事城市灾害风险与公共安全管理研究. E-mail: jwang@geo.ecnu.edu.cn

欧洲第五代ERA5再分析资料是采用最先进的全球资料同化系统和数据库，对各种来源的观测资料（卫星、地面观测、飞机、船舶、无线电探空及测风气球等）进行质量控制和同化处理得到的，具有时间序列长、分辨率高等优点[12]。目前，已有研究对比评估ERA5再分析降水数据与其他降水数据集的性能：如Chen等[13]利用4种再分析降水产品揭示了东亚地区暖季的日变率，并证实再分析产品可用来描述降水的日循环；Gabriela等[14]对比评估了ERA5、ERA-Interim以及CFSR等再分析数据在美国南部和墨西哥地区对降水指标的模拟性能，发现ERA5明显优于其他2组数据；温婷婷等[15]对比评估了CRU、ERA5、CMFD 4种降水数据在青藏高原的适用性，得出ERA5数据与观测值呈现极强相关性，年总降水量相关系数超过0.9。上述研究均证明了ERA5再分析降水数据相较其他降水数据性能更优，能够准确重现降水时空分布，但同时也发现ERA5存在高估降水强度的问题[16-18]。

本文对ERA5再分析降水数据与内蒙古地面站点观测降水数据进行比较，从多时空尺度评价ERA5在内蒙古的适用性；基于此，参考世界气象组织推荐的13个极端降水指数[19]，探讨研究区1981—2021年极端降水的时空变化规律，并对研究区极端降水危险性时空变化特征进行分析。本研究可为内蒙古等地面监测站点稀少地区气候变化降水和灾害风险评估等研究提供数据来源，同时可为该区域制定气候变化适应和防汛减灾策略提供科学依据。

1　研究区概况

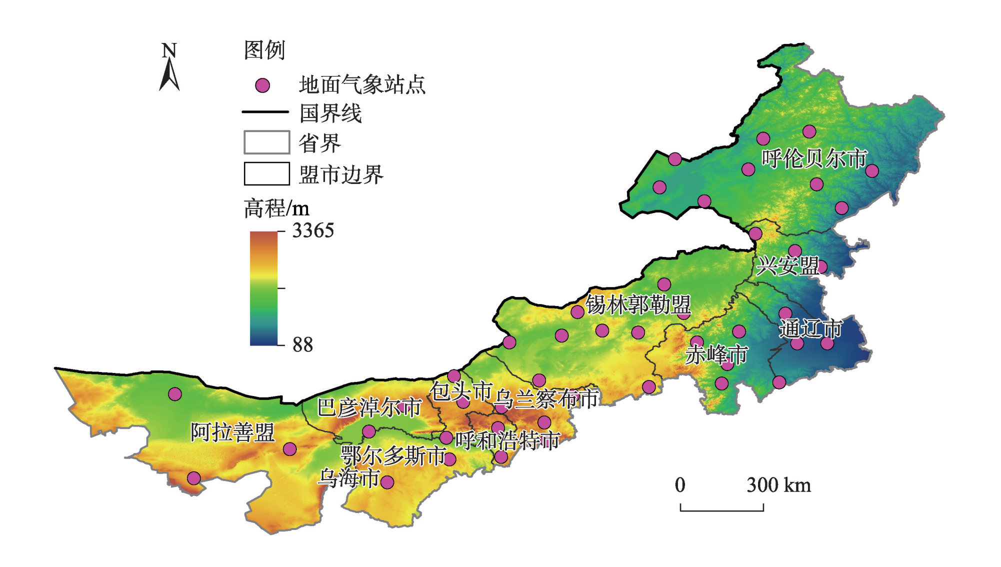
内蒙古（37°24′~53°23′N，97°12′~126°04′E）地处中国北部边疆，面积118.3×10^4 km^2，地势由东北向西南延伸，横跨东北、华北、西北地区，共包含呼和浩特市、鄂尔多斯市等在内的12个地级市（盟）。气候以温带大陆性气候为主，年平均降水量50~450 mm[20]，且年内分布不均，由西南向东北逐渐增加，春季多大风天气，夏季短促炎热，易发生极端降水，秋冬季多发生霜冻、寒潮天气。内蒙古地势较高，平均海拔1000 m左右（图1）。

2　数据与方法

2.1　数据来源

地面台站观测资料为国家气象信息中心提供的中国地面气候资料日值降水数据（http://data.cma.cn/），选择2008年1月1日—2017年12月31日作为评估时段，经严格的质量控制，共筛选出内蒙古45个地面站点。

ERA5再分析降水数据源于欧洲中期天气预报中心（ECMWF）第五代全球再分析资料ERA5数据



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2022)4312号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　内蒙古气象站点分布

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in Inner Mongolia

集(https://cds.climate.copernicus.eu/)。研究选用的数据起止时间为1979年1月1日—2021年12月31日,时间分辨率为逐小时,空间分辨率为0.25°,日、月尺度数据分别由次一级尺度累加得到,日尺度降水数据事先已进行时间校正。

2.2 研究方法

2.2.1 ERA5再分析降水数据评估方法 降水数据的评估方法主要有2种:一种是"格点"对"格点"的评估,即将网格数据插值到地面站点上,与地面站点实测值进行比较[21-24];另一种是"格网"对"格网"的评估,往往通过特定的空间化方法比如克里金插值、双线性插值等[25-27],将站点数据插值得到面状数据再进行比较。本文采用双线性插值方法,考虑站点周围的4个网格作为ERA5在该站点上的数据,分别在年、季、月、日4种时间尺度上,对ERA5与地面站点降水数据进行"格点"对"格点"的评估。其中,季尺度的评估依据我国气象部门传统的划分方法,将4季划分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月—翌年2月)。

评估指标选取方面,选用了误差评价指标和分类统计指标共计6个指标[28-29](表1)。在评估前,首先对ERA5再分析降水数据进行时间校正。统计指标中,相关系数(CC)代表实测数据与待评估数据之间的线性相关程度,最优值为1;相对偏差(BIAS)用来衡量数据的系统偏差程度,最优值为0;均方根误差(RMSE)用于衡量数据之间的离散程度,最优值为0。分类指标中,命中率(POD)用来表现待评估数据集准确捕捉实际降水事件的能力,最优值为1;误报率(FAR)用来反映待评估数据集的误报情况,最优值为0;关键成功指数(CSI)综合POD和FAR情况,反映待评估数据集监测实际降水事件的真实能力,最优值为1。

表1 评价指标描述

Tab. 1 Description of evaluation indicators

评价指标	计算公式	最优值
相关系数(CC)	$\frac{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\bar{G})(S_i-\bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i-\bar{G})^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i-\bar{S})^2}}$	1
相对偏差(BIAS)/%	$\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-G_i)}{\sum_{i=1}^{n}G_i}\times 100\%$	0
均方根误差(RMSE)/mm	$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i-G_i)^2}$	0
命中率(POD)	$\frac{H}{H+M}$	1
误报率(FAR)	$\frac{F}{H+F}$	0
关键成功指数(CSI)	$\frac{H}{H+F+M}$	1

注:n为样本数量;S_i为ERA5再分析数据;G_i为地面站点观测数据;$\bar{S}$、$\bar{G}$分别为ERA5和地面站点观测数据的均值;H为ERA5准确捕捉到降水事件数;M为ERA5漏报的降水事件数;F为ERA5误报的降水事件数。

2.2.2 极端降水指数计算方法 本研究从极端降水的频率、强度和持续时间3个维度,参考世界气象组织定义的13个极端降水指数来表征降水的极端态过程[30],用于分析内蒙古极端降水事件的时空变化特征,所选指标定义见表2。

另外,本研究综合13个极端降水指数,构建了极端降水危险性指数(R),以此来评价内蒙古暴雨洪涝灾害危险性[31-33]。

$$R=\sum_{i=1}^{n}w_iX_i \tag{1}$$

式中:w_i为第i个极端降水指数的权重;X_i为第i个极端降水指数;i取1, 2, 3, …, 13。指标对应权重采用主成分分析法确定(表2)。

2.2.3 时空变化特征分析方法 Theil-Sen Median方法又称为Sen斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法[34-35]。该方法对于测量误差和离群数据不敏感,适用于长时间序列数据的趋势分析,斜率为正表示呈增加趋势,斜率为负则表示呈减少趋势。Mann-Kendall趋势检验(简称M-K检验)可以有效检验气象水文要素的长时间序列的趋势变化和显著性,常用于降水和干旱频次等趋势的检测[36-37]。本文取显著性水平为0.05,若检验量$Z>0$,则表示序列呈上升趋势,且$|Z|>|Z_{\alpha/2}|=1.96$,表示序列呈显著上升趋势;同理,若检验量$Z<0$,且$|Z|>|Z_{\alpha/2}|=1.96$,表示序列呈显著下降趋势,UF和UB统计量交点表示序列的时间突变点。

3 结果与分析

3.1 ERA5降水数据精度评价

3.1.1 不同时间尺度精度评估

(1) 年尺度

基于2008—2017年ERA5降水数据和同期内蒙古45个地面站点降水数据反距离权重插值结果,得

表2　极端降水指数定义

Tab. 2　Definition of extreme precipitation indices

指数	指标	中文名称	定义	单位	权重
频率指数	R10	中雨天数	一年内日降水量≥10 mm的天数	d	0.0690
	R20	暴雨天数	一年内日降水量≥20 mm的天数	d	0.0845
	R30	特大暴雨日数	一年内日降水量≥30 mm的天数	d	0.0868
强度指数	SDII	湿日降水强度	年总降水量与日降水量≥1 mm天数的比值	$mm \cdot d^{-1}$	0.0897
	R95p	强降水量	一年内日降水量>第95%分位值的降水量之和	mm	0.0909
	R99p	极强降水量	一年内日降水量>第99%分位值的降水量之和	mm	0.0962
	PRCPTOT	湿日总降水量	一年内日降水量>1 mm的降水量总和	mm	0.0700
	R95pTOT	强降水总量	R95p与PRCPTOT的比值	%	0.0916
	Rx1day	1 d最大降水量	一年内最大日降水量	mm	0.0950
	Rx5day	5 d最大总降水量	一年内连续5 d最大累积降水量	mm	0.0919
	Rx7day	7 d最大总降水量	一年内连续7 d最大累积降水量	mm	0.0904
持续时间指数	CWD	持续湿润日数	一年内日降水量≥1 mm的最长持续天数	d	0.0340
	CDD	持续干燥日数	一年内日降水量<1 mm的最长持续天数	d	0.0100

到内蒙古多年平均年降水量空间分布图(图2):2种数据得到的降水量等级分界线基本重合,降水量空间分布特征一致,均反应出内蒙古降水由西南向东北递增的特点,年平均降水量均在50~600 mm;呼伦贝尔市降水最充沛,年平均降水量多达550 mm;阿拉善盟西部降水最少,年平均降水量不足100 mm。另外,内蒙古东部赤峰市ERA5的降水量相较于地面站点降水量存在低估。

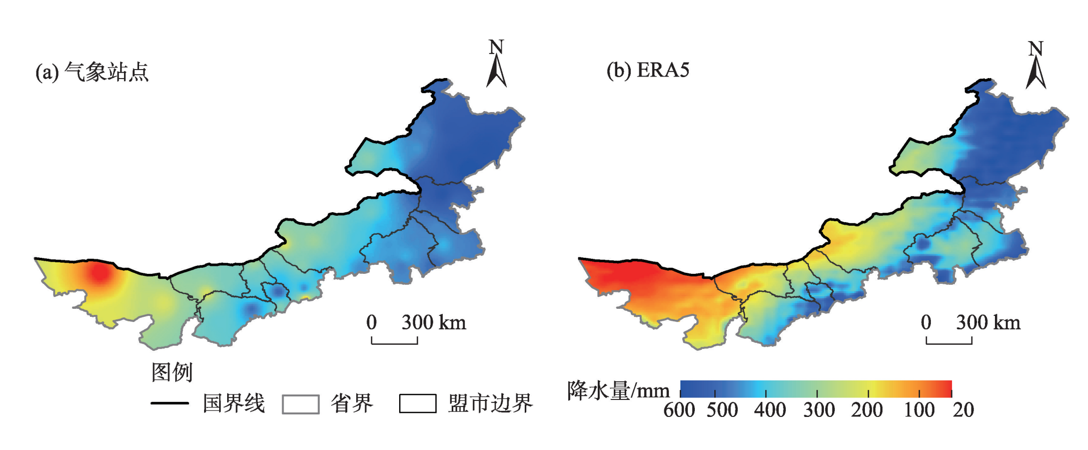


图2　气象站点与ERA5年平均降水量空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of annual average precipitation of meteorological stations and ERA5

(2) 季尺度

由ERA5降水量与地面站点降水量的季尺度散点密度图(图3a~d)可知:ERA5数据在夏季表现最好,CC达0.89,BIAS为0.02,RMSE为59.36 mm;而在冬季表现最差,CC为0.82,BIAS为0.72,RMSE为8.59 mm,RMSE的差异与夏季降水量多而冬季降水少有关。另外从BIAS指标可以发现,ERA5降水数据在内蒙古存在高估,这可能与ERA5数据本身算法误差有关。

(3) 月、日尺度

ERA5与地面站点逐月降水数据变化趋势一致,ERA5降水数据在夏季存在一定误差,对最大月总降水量存在一定程度高估(图4),这与月尺度散点密度图(图3e)结果一致,但在2013年和2014年8月ERA5低估了月降水量。ERA5降水数据与站点数据在日尺度呈强相关性(CC=0.68),低于月尺度(CC=0.88),且在2种时间尺度上ERA5均存在高估(图3f)。

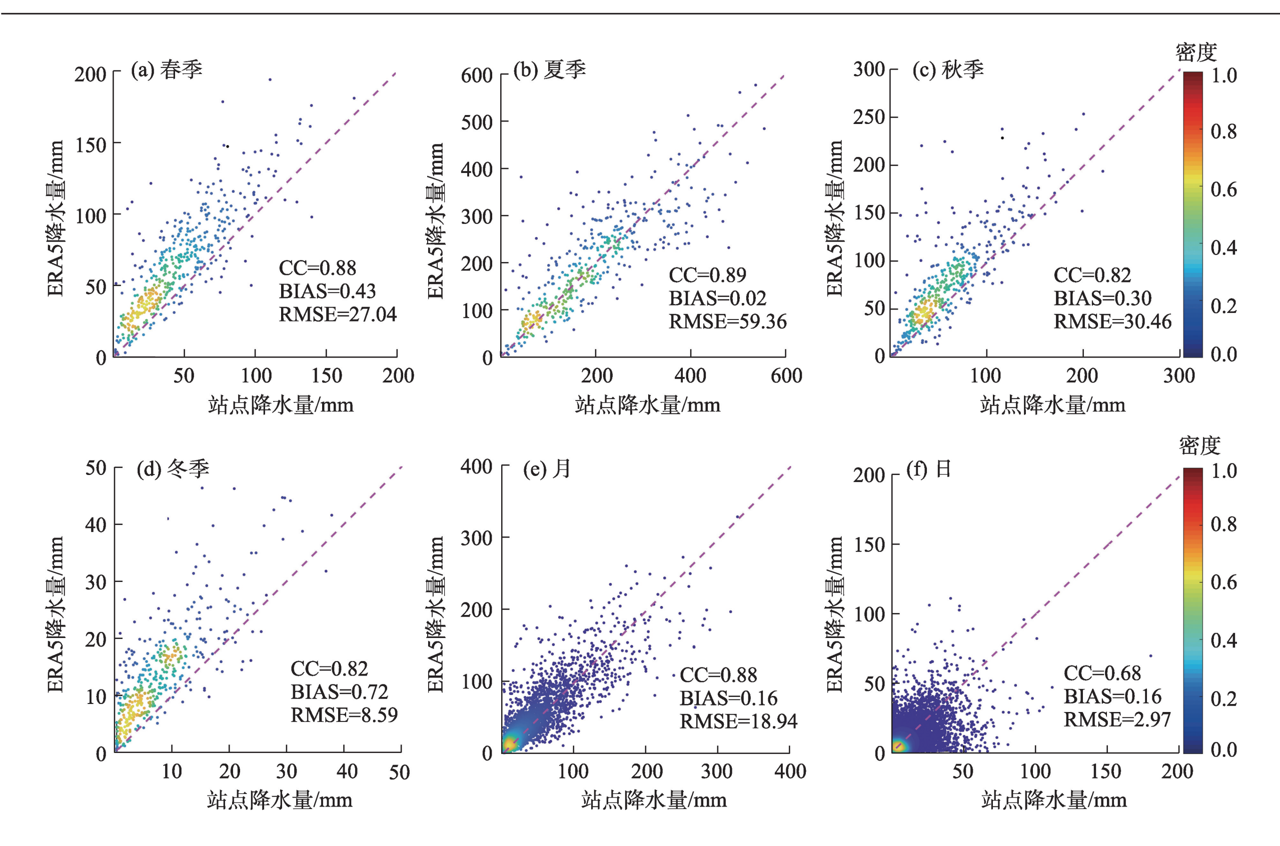


图3　不同时间尺度的ERA5与气象站点降水数据散点密度图

Fig. 3　Density-colored scatterplots of ERA5 and precipitation data of meteorological stations at different time scales

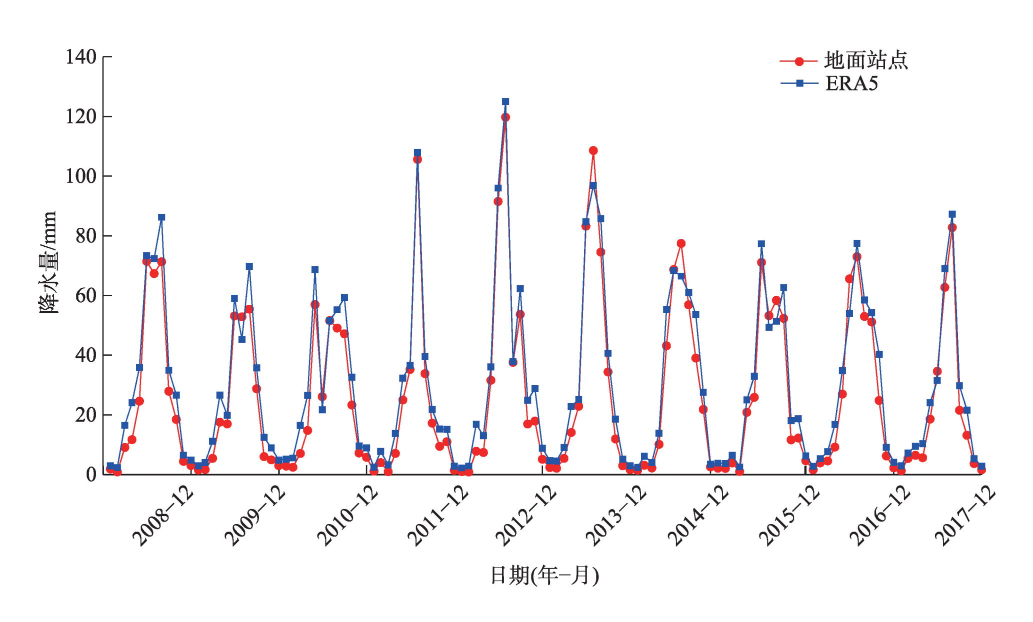
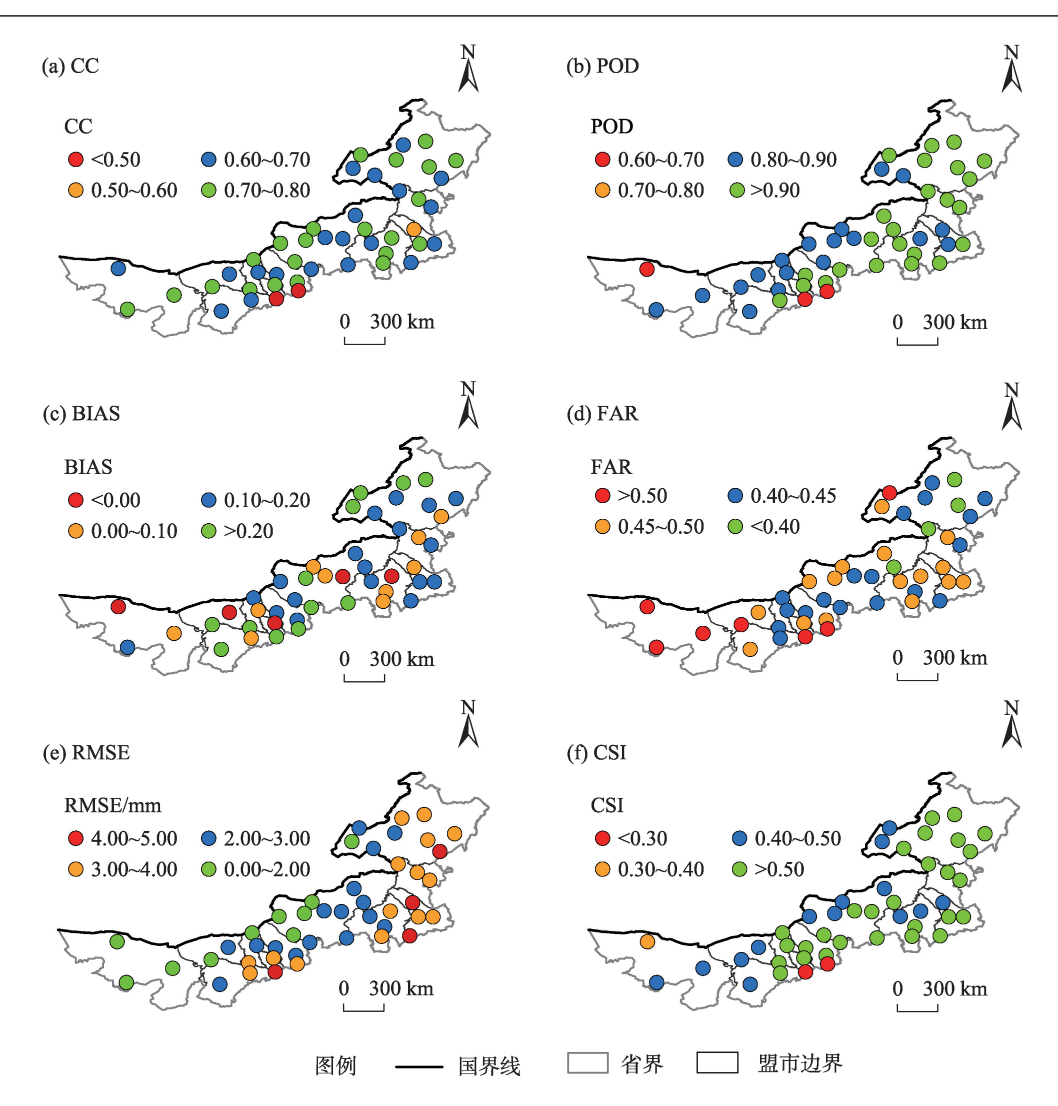


图4　ERA5与气象站点降水数据的月均降水量对比

Fig. 4　Comparison of monthly average precipitation between ERA5 and precipitation data of meteorological stations

3.1.2　基于站点尺度的精度评估　基于站点尺度对ERA5降水数据进行精度评价，以0.1 mm·d^{-1}降水作为是否发生降水的阈值[38]，结果如图5所示。从误差评价指标看，CC在东部地区站点表现优于西部，在日尺度上48.9%的站点CC为0.70~0.80；线性相关性大的站点往往也表现出BIAS高的特点，除5个地面站点表现为较小程度的低估以外，其余站点BIAS均表现出大于10%的高估；降水量大的地区RMSE更大，RMSE呈现出由西南向东北递增的趋势，在数值上由1~2 mm增至3~5 mm。从分类统计指标看，



注：CC为相关系数；POD为命中率；BIAS为相对偏差；FAR为误报率；RMSE为均方根误差；CSI为关键成功指数。下同。

图5 ERA5在不同误差评价指标与分类统计指标下探测能力表现

Fig. 5 Detection capability performance of ERA5 under different error evaluation indicators and classification statistics indicators

POD在内蒙古东部表现优于西部，西部站点能捕捉到90%以上的降水事件，东部站点POD为0.80~0.90，整个内蒙古仅有3个站点的POD在0.70之下；75.6%的站点FAR为0.40~0.50，且西部站点大于东部站点，这与东西部降水量分布不均有很大关系；CSI反应出ERA5数据集监测实际降水事件的真实能力，与POD指标表现一致。

3.1.3 不同强度降水的探测精度评估 为了评估ERA5降水数据对于不同强度降水探测精度的差异程度，绘制了POD、FAR和CSI 3个分类统计指标在不同阈值下的折线图（图6）。POD和CSI随着阈值的增大而减小，即ERA5降水数据的探测性能随降水阈值的增加而下降，FAR整体呈小幅上升的态势。0.1 mm·d^{-1}常被作为判断是否发生降水的阈值，此时POD可达到0.9，即ERA5能捕捉到90%的降水事件；而在阈值达到15 mm·d^{-1}时，ERA5精度明显下降，FAR会高于POD。

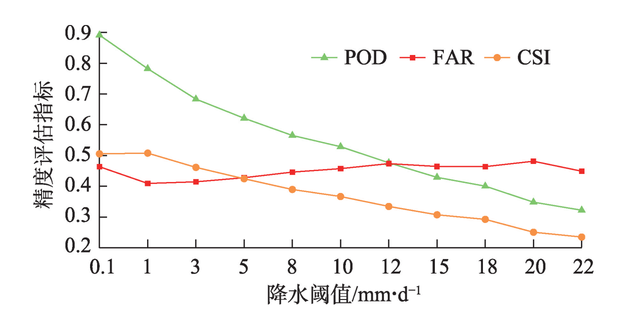


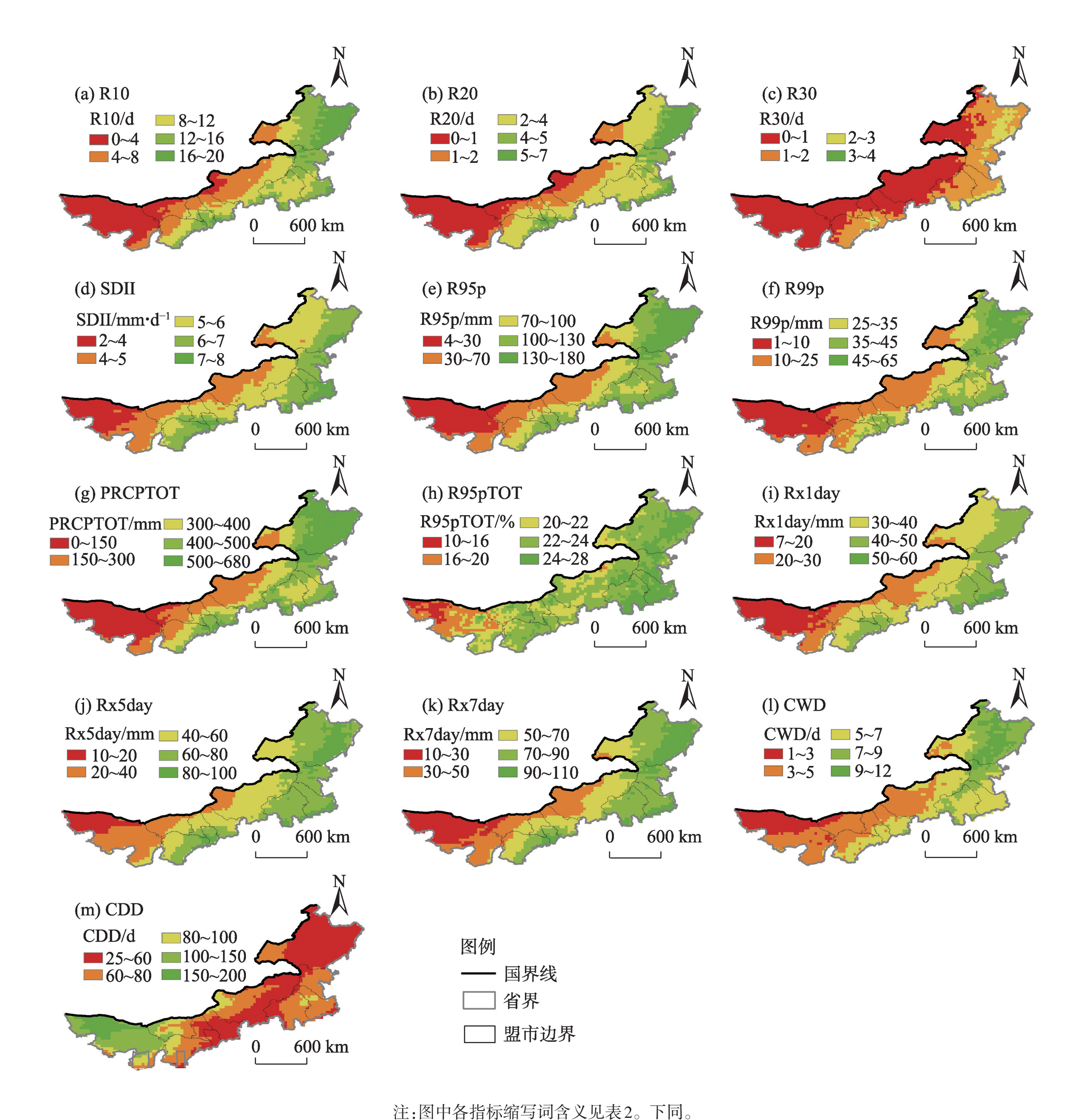
图6 不同降水阈值下ERA5降水数据探测能力表现

Fig. 6 Detection capability performance of ERA5 precipitation data under different precipitation thresholds

3.2 极端降水指数时空演变特征

3.2.1 极端降水指数的空间变化 13个极端降水指数在内蒙古均呈现出自西向东的空间分布特征(图7),其中频率指数R10、R20和R30自西向东依次递减,呼伦贝尔市降水量东西差异最大,横跨5个等级;从降水强度来看,呼和浩特市、通辽市、呼伦贝尔市等SDII可达到7~8 $mm\cdot d^{-1}$,R95pTOT可达24%~28%;持续时间指数CDD在25~200 d范围内,东西跨度大,除阿拉善盟外,其余地区CDD均少于100 d,CWD空间分布特征与CDD指数相反,且在数值上远小于CDD。

从极端降水空间变化趋势来看(图8),频率指数R10在内蒙古东部呼伦贝尔市、赤峰市、通辽市、锡林郭勒盟以及呼和浩特市等市(盟)呈明显下降趋势,最大Sen斜率为-1.667 $mm\cdot(10a)^{-1}$,表现出在人口密集区域明显降低的特征,R20仅在呼和浩特市有明显下降趋势,而R30在整个内蒙古变化趋势不显著。强度指数R95p、Rx5day、Rx7day在内蒙古西部阿拉善盟、鄂尔多斯市以及东部呼伦贝尔市局部地区呈增加趋势,在中部呼和浩特市、锡林郭勒



注:图中各指标缩写词含义见表2。下同。

图7 1981—2021年13个极端降水指数的空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of 13 extreme precipitation indices from 1981 to 2021

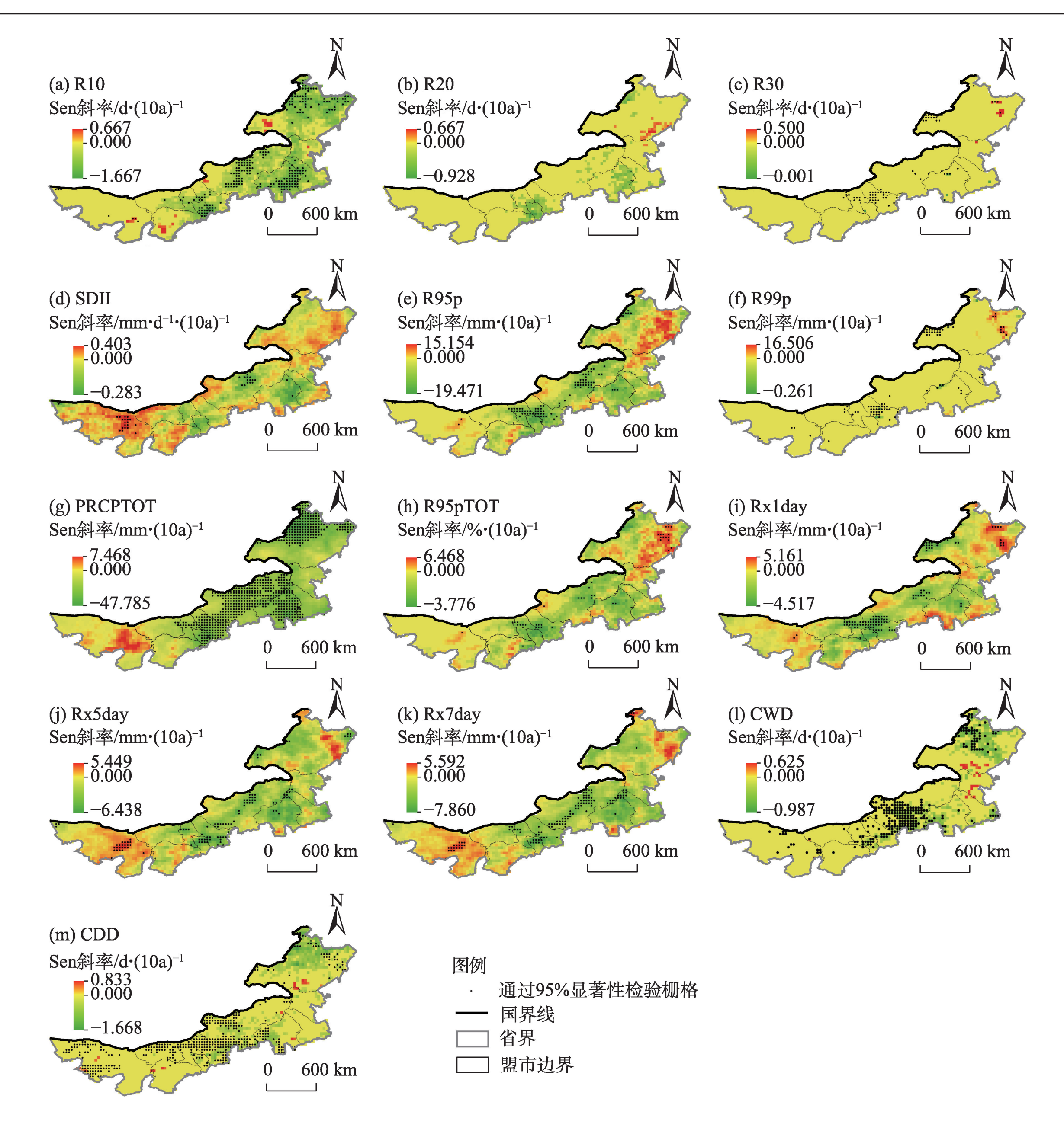
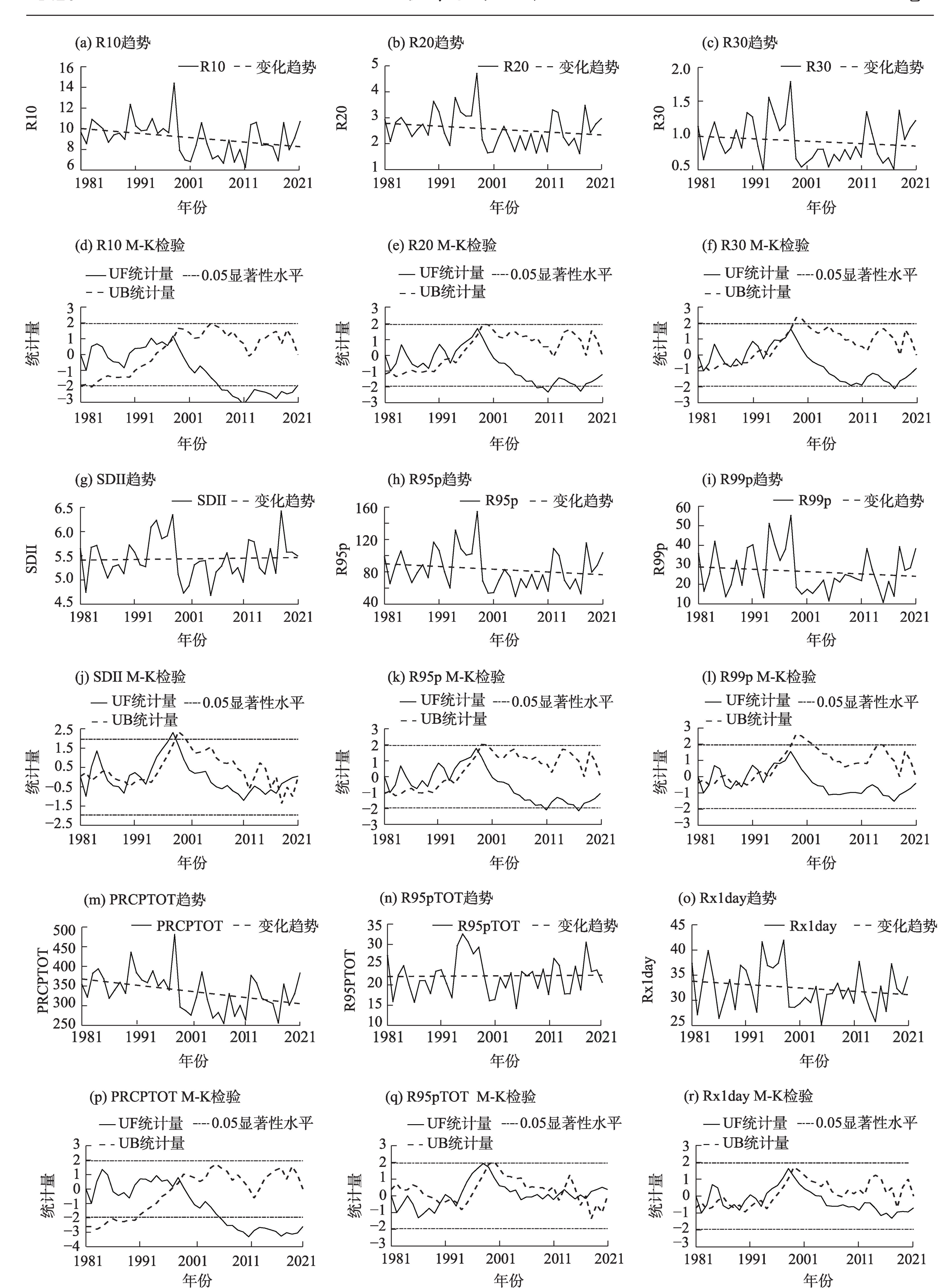


图8 1981—2021年13个极端降水指数的空间变化趋势

Fig. 8 Spatial variation trends of 13 extreme precipitation indices from 1981 to 2021

盟、赤峰市以及通辽市等部分地区呈减少趋势，其中R95p的Sen斜率最大，为19.47 mm·$(10a)^{-1}$；SDII、R95pTOT以及Rx1day在内蒙古西部阿拉善盟、鄂尔多斯市、中部锡林郭勒盟以及东部赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市等局部地区呈增加的趋势，而在呼和浩特市、赤峰市等局部地区呈减少趋势；PRCPTOT在内蒙古大部分区域均呈现显著减小趋势；R99p在内蒙古变化趋势不显著。持续时间指数CDD在内蒙古西部阿拉善盟，中部巴彦淖尔市、包头市、乌兰察布市，以及东部呼伦贝尔市下降趋势显著；CWD在锡林郭勒盟东部和呼伦贝尔市北部地区下降趋势显著。

3.2.2 极端降水指数的年际变化 1981—2021年极端降水的年际变化的频率、强度及持续时间变化趋势如图9所示，除CDD外，其余指数在内蒙古均表现为下降趋势。频率指数R10、R20、R30在近40 a的Sen斜率分别为−0.439 d·$(10a)^{-1}$、−0.125 d·$(10a)^{-1}$和−0.036 d·$(10a)^{-1}$，R30变化趋势小的原因为内蒙古日降水量难以达到30 mm。强度指数R95pTOT呈增加趋势，Sen斜率为0.32%·$(10a)^{-1}$；SDII呈微弱增加趋势，Sen斜率为0.001 mm·d^{-1}·$(10a)^{-1}$；R95p、R99p、PRCPTOT、Rx1day、Rx5day以及Rx7day均呈


(a) R10趋势
— R10 - - 变化趋势
R10
年份
(b) R20趋势
— R20 - - 变化趋势
R20
年份
(c) R30趋势
— R30 - - 变化趋势
R30
年份
(d) R10 M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(e) R20 M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(f) R30 M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(g) SDII趋势
— SDII - - 变化趋势
SDII
年份
(h) R95p趋势
— R95p - - 变化趋势
R95p
年份
(i) R99p趋势
— R99p - - 变化趋势
R99p
年份
(j) SDII M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(k) R95p M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(l) R99p M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(m) PRCPTOT趋势
— PRCPTOT - - 变化趋势
PRCPTOT
年份
(n) R95pTOT趋势
— R95pTOT - - 变化趋势
R95pTOT
年份
(o) Rx1day趋势
— Rx1day - - 变化趋势
Rx1day
年份
(p) PRCPTOT M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(q) R95pTOT M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份
(r) Rx1day M-K检验
— UF统计量 ---- 0.05显著性水平
- - UB统计量
统计量
年份

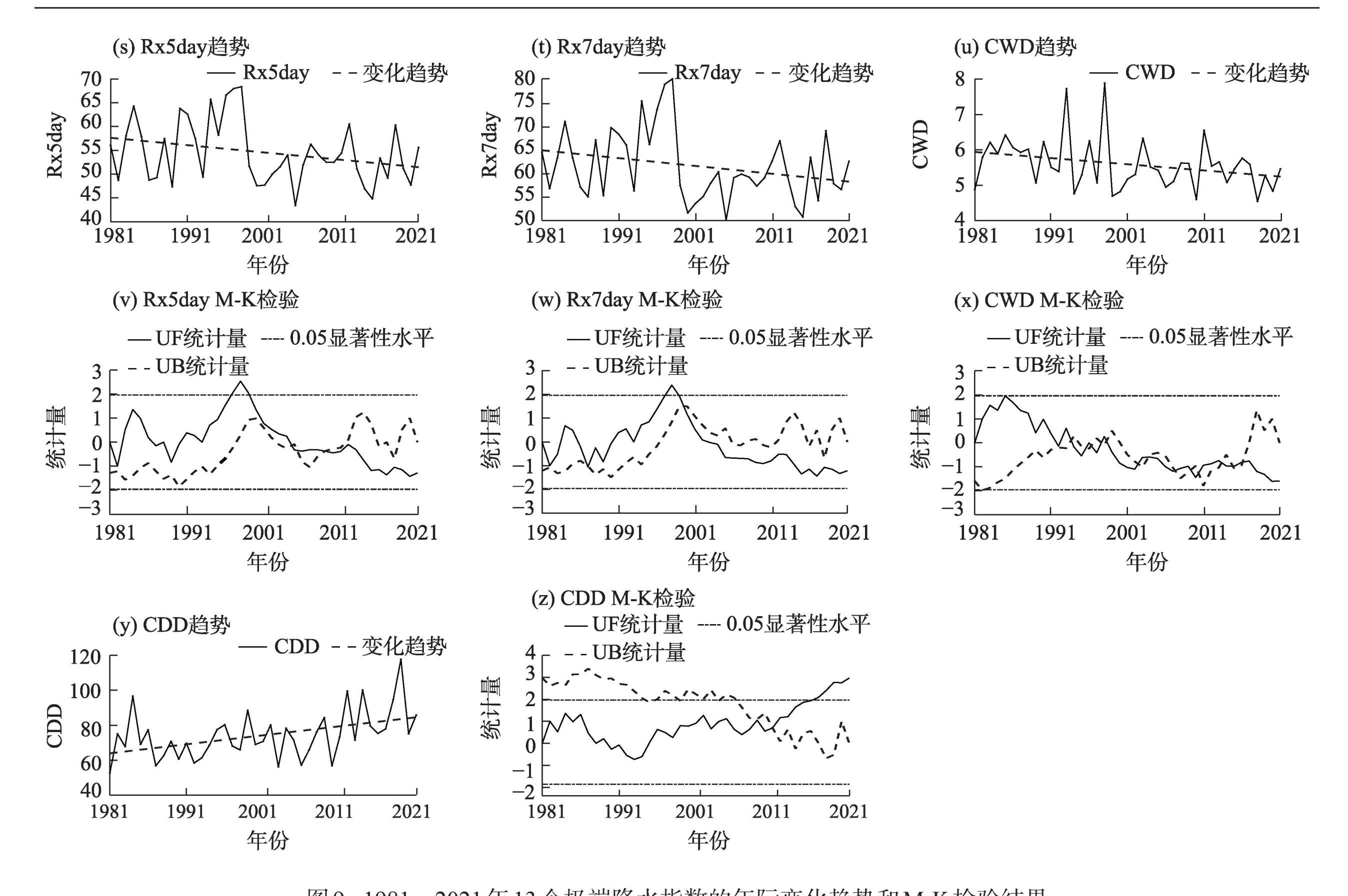


图9 1981—2021年13个极端降水指数的年际变化趋势和M-K检验结果

Fig. 9 Inter-annual variation trends and M-K test results of 13 extreme precipitation indices from 1981 to 2021

减少趋势，但下降趋势不显著，其中PRCPTOT下降速率最快，为−17.36 mm·(10a)$^{-1}$。频率和强度指数均在1999年存在时间突变点，1999年前后趋势变化程度或方向发生明显变化，可见1999年是内蒙古气候变化的关键时间点。持续时间指数CWD和CDD空间变化相反，其Sen斜率分别为−0.150 d·(10a)$^{-1}$和4.924 d·(10a)$^{-1}$，且2个指数在2010年均有时间突变点，在2010年前后时间序列呈不同程度的增加(减小)趋势。

3.3 极端降水危险性时空演变特征

由1981—2021年内蒙古极端降水危险性指数的时空变化特征(图10)可以发现，内蒙古极端降水危险性指数整体呈下降趋势，Sen斜率为−0.041·(10a)$^{-1}$，极端降水危险性指数在1999年发生显著突变，1981—1999年和2000—2021年危险性呈上升趋势。内蒙古极端降水危险性指数在空间上存在显著差异：有56%区域极端降水危险性指数呈上升趋势，其中1.93%的区域呈显著上升，极端降水危险性指数的Sen斜率为−0.157~0.177·(10a)$^{-1}$；在内蒙古东北部的呼伦贝尔市和兴安盟，西南部的巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、乌海市、阿拉善盟等地极端降水危险性指数呈上升趋势，且在阿拉善盟东部存在高值中心；而在呼和浩特市、乌兰察布市、包头市、锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市等地呈下降趋势，并在乌兰察布市存在低值中心。

4 讨 论

可靠的降水估算不仅是气候变化影响趋势和波动等研究的重要内容，也是开展干旱、洪涝等灾害监测与应对的重要基础性工作。从论文采取的6个统计指标来看，ERA5再分析降水数据在内蒙古具有较高的可靠性，可作为内蒙古降水研究的一种新的数据源。该数据在日尺度上的相关性最低，这可能是因为年、季和月降水量是由日降水量合成，存在误差抵消效应。这种效应与东亚地区[13]、青藏高原地区[15]以及长江三角洲地区[26]等相关研究具有一致性。研究也发现ERA5存在高估问题，推测可能是因为部分降水在被站点检测到之前被蒸发[22]，也可能与再分析技术中格网对流参数化方案的缺陷和对固体降水的不准确估计有关[38]，但总体上误差

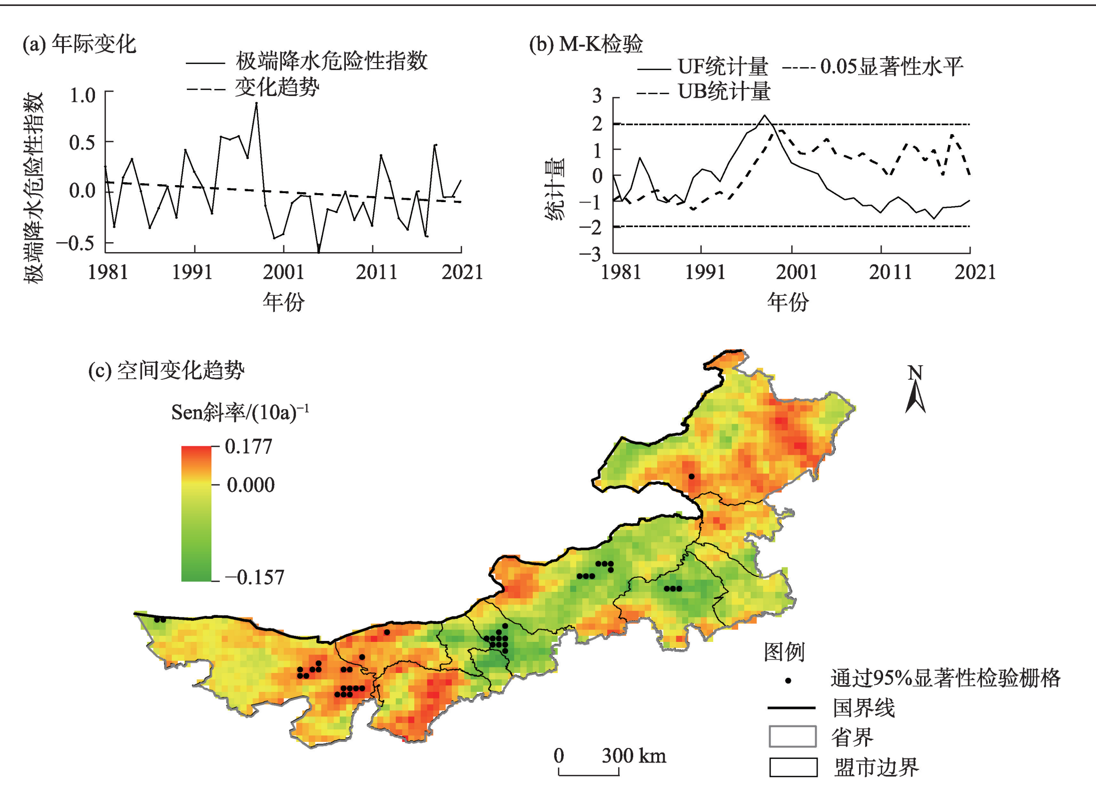


图10 1981—2021年内蒙古极端降水危险性指数的时空变化特征

Fig. 10 Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation danger index in Inner Mongolia from 1981 to 2021

并不大。

极端降水的变化会诱发城市旱涝灾害，威胁城市安全，影响社会经济发展。本研究在前人研究基础上引入了极端降水危险性指数，将极端降水与其危险性建立联系，揭示了内蒙古极端降水危险性的时空变化特征，研究结果与白美兰[1]、尤莉等[2]和刘泓志等[3]的研究结果相一致。尽管内蒙古极端降水的频次整体呈减少趋势，但在局部地区极端降水的强度却出现明显增加趋势。内蒙古极端降水危险性在人口相对密集、经济较发达的市（盟），如鄂尔多斯市、呼伦贝尔市、巴彦淖尔市、兴安盟表现为增加趋势，应关注极端降水对这些城市带来的洪涝灾害影响，提升极端降水预报预警和洪涝灾害应急响应能力。另外，部分区域极端降水危险性指数显著下降，如锡林郭勒盟草原等，这一结果与金令等[35]、马梓策[39]等研究得出的锡林郭勒盟草原东部属于旱灾高危险性的认识相一致。内蒙古草原地区降水趋于减少可能会对草原生物多样性和生态屏障功能产生影响，进而影响到区域生态安全，故应关注这些区域气候变化趋势预估，并加强降水监测与生态风险预警。

5 结 论

（1）ERA5降水数据能较好再现内蒙古降水过程，但相较于站点观测数据，整体存在高估。月尺度（CC=0.88）精度表现优于日尺度（CC=0.68），这是由于月尺度削减了日尺度上的降水差异；季尺度上，ERA5与站点观测降水数据在夏季相关性最高，而在冬季最小，这可能与夏季降水量大、冬季降水量小有关。从空间上看，ERA5数据在东部站点的表现明显优于西部，且ERA5的探测性能随着降水强度的增加而下降。

（2）从极端降水指数的年际变化来看，近40 a内蒙古年湿日总降水量（PRCPTOT）减少，Sen斜率为17.36 mm·(10a)$^{-1}$，除强度指数SDII、R95pTOT以及持续时间指数CDD呈上升趋势，其余极端降水指数 R10、R20、R30、R95p、R99p、Rx1day、Rx5day、Rx7day、CWD均呈现下降趋势；除CDD外，其余12个极端降水指数均在1999年发生时间突变，1999年为内蒙古气候状态发生变化的关键点。

（3）从空间上看，内蒙古极端降水呈现明显的“西南—东北”带状分布，表现为由西南向东北递

增,空间变化趋势表现出明显的区域分异特征。内蒙古西部地区除部分强度指数(SDII、PRCPTOT、Rx5day、Rx7day)呈现增加外,其余指数均无明显变化趋势;中部地区多数极端降水指数(R10、R20、SDII、R95p、PRCPTOT、R95PTOT、Rx1day、Rx5day、Rx7day以及CDD)呈显著减少趋势;东部地区则在多数强度指数(SDII、R95p、R99p、R95PTOT、Rx1day、Rx5day以及Rx7day)上表现为增加,而在频率指数(R10)和持续时间指数(CWD、CDD)上表现为减少。

(4) 近40 a内蒙古极端降水的频次整体呈现减少趋势,但在局部地区极端降水的强度却呈现显著增加趋势。综合13个极端降水指数发现,极端降水危险性指数在鄂尔多斯市、呼伦贝尔市、巴彦淖尔市、兴安盟等人口相对密集、经济发展较快的市(盟)存在高值中心,表现为显著增加趋势,Sen斜率为0.177·$(10a)^{-1}$,未来应关注这些区域的极端降水变化特征,加强监测、预警与应急响应。

参考文献(References)

[1] 白美兰, 郝润全, 高建峰, 等. 内蒙古地区极端气候事件分布特征及对农业影响评估[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 21-27. [Bai Meilan, Hao Runquan, Gao Jianfeng, et al. Distribution character of extreme climatic events and evaluation of its influence on agriculture in Inner Mongolia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 21-27.]

[2] 尤莉, 戴新刚, 张宇. 1961—2008年内蒙古降水极端事件分析[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 411-416. [You li, Dai Xingang, Zhang Yu. Extreme precipitation events in Inner Mongolia in 1961—2008[J]. Climate Change Research, 2010, 6(6): 411-416.]

[3] 刘泓志, 肖长来, 张岩祥, 等. 内蒙古50余年降水量分布演变特征及趋势[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 74-78. [Liu Hongzhi, Xiao Changlai, Zhang Yanxiang, et al. Analysis on temporal characteristics and trend of precipitation over the past 50 years in Inner Mongolia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 74-78.]

[4] Haile A T, Yan F, Habib E. Accuracy of the CMORPH satellite-rainfall product over Lake Tana Basin in eastern Africa[J]. Atmospheric Research, 2015, 163: 177-187.

[5] Ma Q, Li Y, Feng H, et al. Performance evaluation and correction of precipitation data using the 20-year IMERG and TMPA precipitation products in diverse subregions of China[J]. Atmospheric Research, 2021, 249: 105304, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105304.

[6] Mantas V M, Liu Z, Caro C, et al. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes [J]. Atmospheric Research, 2015, 163: 132-145.

[7] Yong B, Chen B, Gourley J J, et al. Intercomparison of the Version-6 and Version-7 TMPA precipitation products over high and low latitudes basins with independent gauge networks: Is the newer version better in both real-time and post-real-time analysis for water resources and hydrologic extremes?[J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 77-87.

[8] 唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 607-615. [Tang Guoqiang, Wan Wei, Zeng Ziyue, et al. An overview of the global precipitation measurement (GPM) Mission and it's latest development[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30 (4): 607-615.]

[9] 黄依之, 张行南, 方园皓. CMORPH卫星反演降水数据质量评估及水文过程模拟[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 1-4. [Huang Yizhi, Zhang Xingnan, Fang Yuanhao. Evaluation of CMORPH satellite rainfall data and its application in hydrologic process simulation[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(9): 1-4.]

[10] Tan M L, Santo H. Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia[J]. Atmospheric Research, 2018, 202: 63-76.

[11] 岳书平, 闫业超, 张树文, 等. 基于ERA5-LAND的中国东北地区近地表土壤冻融状态时空变化特征[J]. 地理学报, 2021, 76 (11): 2765-2779. [Yue Shuping, Yan Yechao, Zhang Shuwen, et al. Spatiotemporal variations of soil freeze-thaw state in northeast China based on the ERA5-LAND dataset[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2765-2779.]

[12] Jiao D L, Xu N N, Yang F, et al. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 17956, doi: 10.1038/s41598-021-97432-y.

[13] Chen G X, Iwasaki T, Qin H L, et al. Evaluation of the warm-season diurnal variability over East Asia in recent reanalyses JRA-55, ERA-Interim, NCEP CFSR, and NASA MERRA[J]. Journal of Climate, 2014, 27(14): 5517-5537.

[14] Gabriela C R, Tereza C. Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(11): 5406-5430.

[15] 温婷婷, 郭英香, 董少睿, 等. 1979—2017年CRU、ERA5、CMFD格点降水数据在青藏高原适用性评估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 684-697. [Wen Tingting, Guo Yingxiang, Dong Shaorui, et al. Assessment of CRU, ERA5, CMFD grid precipitation data for the Tibetan Plateau from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 684-697.]

[16] Amjad M, Yilmaz M T, Yucel I, et al. Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124707, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124707.

[17] Sharifi E, Eitzinger J, Dorigo W. Performance of the state-of-the-art gridded precipitation products over mountainous terrain: A re-

gional study over Austria[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2018, doi: 10.3390/rs11172018.

[18] Jiang Q, Li W Y, Wen J H, et al. Evaluation of satellite-based products for extreme rainfall estimations in the eastern coastal areas of China[J]. Journal of Integrative Environmental Sciences, 2019, 16: 191–207.

[19] 尹红, 孙颖. 基于ETCCDI指数2017年中国极端温度和降水特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 363–373. [Yin Hong, Sun Ying. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices[J]. Climate Change Research, 2019, 15(4): 363–373.]

[20] 马爱华, 岳大鹏, 赵景波, 等. 近60 a来内蒙古极端降水时空变化及其影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 74–85. [Ma Aihua, Yue Dapeng, Zhao Jingbo, et al. Spatiotemporal variation and effect of extreme precipitation in Inner Mongolia in recent 60 years [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 74–85.]

[21] 许心怡, 李建柱, 冯平. 不同降水产品在滦河流域径流模拟中的适用性[J]. 水力发电学报, 2021, 40(12): 25–39. [Xu Xinyi, Li Jianzhu, Feng Ping. Applicability of different precipitation products to runoff simulations of Luanhe River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(12): 25–39.]

[22] Xu F L, Guo B, Ye B, et al. Systematical evaluation of GPM IMERG and TRMM 3b42v7 precipitation products in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 697, doi: 10.3390/rs11060697.

[23] 甘富万, 李彦婕, 倪倩, 等. 五种卫星降水产品在沿海流域多时空尺度的综合精度评估[J]. 中国农村水利水电, 2022(4): 72–79. [Gan Fuwan, Li Yanjie, Ni Qian, et al. Comprehensive accuracy evaluation of five satellite precipitation products in the coastal basin at multiple spatio-temporal scales[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4): 72–79.]

[24] 李彦妮, 黄昌, 庞国伟. 全球降雨计划GSMaP与IMERG卫星降雨产品在陕西地区的精度评估[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 80–90. [Li Yanni, Huang Chang, Pang Guowei. Accuracy assessment of GSMaP and IMERG satellite precipitation products in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 80–90.]

[25] 任英杰, 雍斌, 鹿德凯, 等. 全球降水计划多卫星降水联合反演IMERG卫星降水产品在中国大陆地区的多尺度精度评估[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 560–572. [Ren Yingjie, Yong Bin, Lu Dekai, et al. Evaluation of the integrated multi-satellite retrievals (IMERG) for global precipitation measurement (GPM) mission over the mainland China at multiple scales[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 560–572.]

[26] 姚飛, 杨秀芹, 刘慕嘉, 等. ERA5再分析降水数据在长江三角洲的性能评估[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 178–189. [Yao Fei, Yang Xiuqin, Liu Mujia, et al. Performance evaluation of ERA5 reanalysis precipitation data in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 178–189.]

[27] 王蕊, 余钟波, 杨传国, 等. TRMM/GPM卫星降水产品在淮河上游逐日和小时尺度的精度评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 109–115. [Wang Rui, Yu Zhongbo, Yang Chuanguo, et al. Accuracy evaluation of TRMM/GPM satellite precipitation products on daily and hourly scales in upper reaches of Huaihe River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 109–115.]

[28] Zhou C G, Gao W, Hu J, et al. Capability of IMERG V6 early, late, and final precipitation products for monitoring extreme precipitation events[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 689, doi: 10.3390/rs13040689.

[29] Yong B, Ren L L, Hong Y, et al. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe Basin, China[J]. Water Resources Research, 2010, 46(7): 759–768.

[30] 周旗, 张海宁, 任源鑫. 1961—2016年渭河流域极端降水事件研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 833–841. [Zhou Qi, Zhang Haining, Ren Yuanxin. Extreme precipitation events in the Weihe River Basin from 1961 to 2016[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 833–841.]

[31] 徐玉霞. 基于GIS的陕西省洪涝灾害风险评估及区划[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 103–108. [Xu Yuxia. Assessment and regionalization of flood disaster risk in Shaanxi Province based on GIS[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 103–108.]

[32] 李思慧. 内蒙古东南部暴雨洪涝灾害风险评估与区划——以通辽市为例[J]. 内蒙古气象, 2019(1): 23–28. [Li Sihui. Risk assessment and zonation of rainstorm and flood disasters in the southeast region of Inner Mongolia: A case study of Tongliao[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2019(1): 23–28.]

[33] 黄晓远, 李谢辉. 基于CMIP6的西南暴雨洪涝灾害风险未来预估[J]. 应用气象学报, 2022, 33(2): 231–243. [Huang Xiaoyuan, Li Xiehui. Future projection of rainstorm and flood disaster risk in southwest China based on CMIP6 models[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(2): 231–243.]

[34] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379–1389.

[35] 金令, 王永芳, 郭恩亮, 等. 基于SPEIbase v.2.6数据集的内蒙古旱灾危险性评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 695–705. [Jin Ling, Wang Yongfang, Guo Enliang, et al. Evaluation of drought hazards in Inner Mongolia based on SPEIbase v.2.6 dataset[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 695–705.]

[36] 肖杨, 周旭, 罗雪, 等. 黔中地区近60年潜在蒸散量时空变化特征及主导因素识别[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 190–198. [Xiao Yang, Zhou Xu, Luo Xue, et al. Spatiotemporal variation characteristics of potential evapotranspiration and identification of leading factors in central Guizhou in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 190–198.]

[37] 范磊, 吕爱锋, 张文翔. 青海省干旱时空特征及与大气环流响应关系[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 60–65. [Fan Lei, Lü

Aifeng, Zhang Wenxiang. Temporal-spatial variation characteristics of drought and its relationship with atmospheric circulation in Qinghai Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 60−65.]

[38] Jiang Q, Li W Y, Fan Z D, et al. Evaluation of ERA5 reanalysis precipitation dataset over Chinese Mainland[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 125660, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125660.

[39] 马梓策, 孙鹏, 姚蕊, 等. 内蒙古地区干旱时空变化特征及其对植被的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 231−240. [Ma Zice, Sun Peng, Yao Rui, et al. Temporal and spatial variation of drought and its impact on vegetation in Inner Mongolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 231−240.]

Performance evaluation of ERA5 reanalysis precipitation data and spatiotemporal characteristics of extreme precipitation in Inner Mongolia

NIU Yiying[1,2,3], LI Chunlan[4], WANG Jun[1,2,3], XU Hanqing[1,2,3,5], LIU Qing[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Geographic Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geographic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Research Center for Urban Public Security, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 4. School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 5. Institute of Eco-Chongming, East China Normal University, Shanghai 202162, China)

Abstract: ERA5 is a new generation reanalysis product launched by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts that can provide a new source of precipitation data for areas with few ground observation stations. Based on the daily precipitation data of 45 ground stations in Inner Mongolia, China from 2008 to 2017, we evaluated the accuracy of ERA5 reanalysis precipitation data on multiple temporal and spatial scales using multiple evaluation indicators and applied a comprehensive weighting model to construct an extreme precipitation danger index by integrating 13 extreme precipitation indices. We then used principal component analysis, Sen's slope method, and a Mann-Kendall trend test to analyze the temporal and spatial changes of extreme precipitation and extreme precipitation danger in the region from 1981 to 2021. The results show that: (1) ERA5 can reproduce the precipitation process better; the ERA5 precipitation reanalysis dataset performs better at a monthly time scale than at a daily time scale, and its accuracy is highest in summer and lowest in winter. ERA5 precipitation data are highly correlated with observed data at monthly and seasonal scales (correlation coefficient>0.85) and are strongly correlated with observed data at a daily scale (correlation coefficient=0.68). The detection accuracy of ERA5 data is better for the eastern stations than for the western stations. (2) Extreme precipitation indices showed a downward trend except for daily wet precipitation intensity, total heavy precipitation, and continuous dry days. The annual total wet day precipitation declined fastest, and the Sen's slope value was $-15.74\ \mathrm{mm\cdot(10a)^{-1}}$. (3) The extreme precipitation indices show clear regional spatial differentiation. Extreme precipitation shows an increase in intensity in western Inner Mongolia, a decrease in frequency, intensity, and duration in mid-Inner Mongolia, and an increase in intensity, frequency, and duration in eastern Inner Mongolia. (4) The extreme precipitation danger index has high central values and shows significant upward trends in Ordos City, Hulun Buir City, Bayannur City, Hinggan League, and other cities/leagues with relatively dense populations and rapid economic development and should therefore receive special attention. The results of this study can facilitate the discovery of better datasets for the analysis of climate factors in Inner Mongolia, and the study provides a theoretical basis for the formulation of climate change adaptation measures and future climate prediction.

Key words: ERA5; precipitation; accuracy evaluation; extreme precipitation index; Inner Mongolia